

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИРКОНИЯ И РЗМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОЙ КАТАНКИ

Бернгардт В.А., Федорова О.В.

Руководители – профессор, д-р. хим. наук Жереб В.П;

доцент, канд. техн. наук Дроздова Т.Н.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Berngardt19@mail.ru

Проведен сравнительный анализ влияния циркония, железа и РЗМ на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Установлено, что для достижения свойств, заданных в ASTM B941–05, циркония и железа требуется на порядок меньше, чем РЗМ. Однако сплавы, легированные цирконием, необходимо подвергать дополнительной термической обработке.

Электротехническая промышленность в современных условиях ориентирована на использование электропроводных материалов, которые сохраняют высокую прочность при эксплуатационных нагревах. Для решения этой задачи наиболее перспективным направлением является создание низколегированных алюминиевых сплавов с добавкой циркония. Выбор циркония обусловлен его способностью резко повышать температурный порог рекристаллизации, что и позволяет проводам работать при повышенных температурах.

Другим решением проблемы повышения жаропрочности алюминиевых сплавов является легирование их редкоземельными металлами (РЗМ). Редкоземельные металлы Се и La относятся к группе малорастворимых элементов, которые образуют с алюминием промежуточные фазы, обычно кристаллизующиеся в составе эвтектик. Эти фазы, как правило, тугоплавкие, а эвтектические температуры близки к температуре плавления алюминия, что положительно влияет на показатели жаропрочности.

Объектами исследования являлась катанка из сплавов Al–(0,20–0,36)%Zr–(0,20–0,28)%Fe и Al–0,5–3,5%РЗМ. Катанку диаметром 9 мм получали непрерывным литьем заготовки на колесо литейно-прокатного агрегата (ЛПА) с последующей сортовой прокаткой на многоклетьевом прокатном стане, а также по технологии совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛИПП).

На первом этапе работы проводился анализ влияния циркония и железа на структуру и свойства катанки. Цирконий вводили в сплавы для повышения термостойкости, а железо – для увеличения прочностных свойств деформированных полуфабрикатов.

Микроструктура образцов катанки в поперечном сечении состоит из зерен пересыщенного цирконием α -твердого раствора на основе алюминия и

мелких железосодержащих частиц избыточных фаз, расположенных по границам дендритных ячеек ориентированных в направлении прокатки, часть включений образует строчечность (рис.1). Повышение концентрации циркония приводит к уменьшению размера зерна. Повышение железа к увеличению объемной доли железосодержащих фаз.

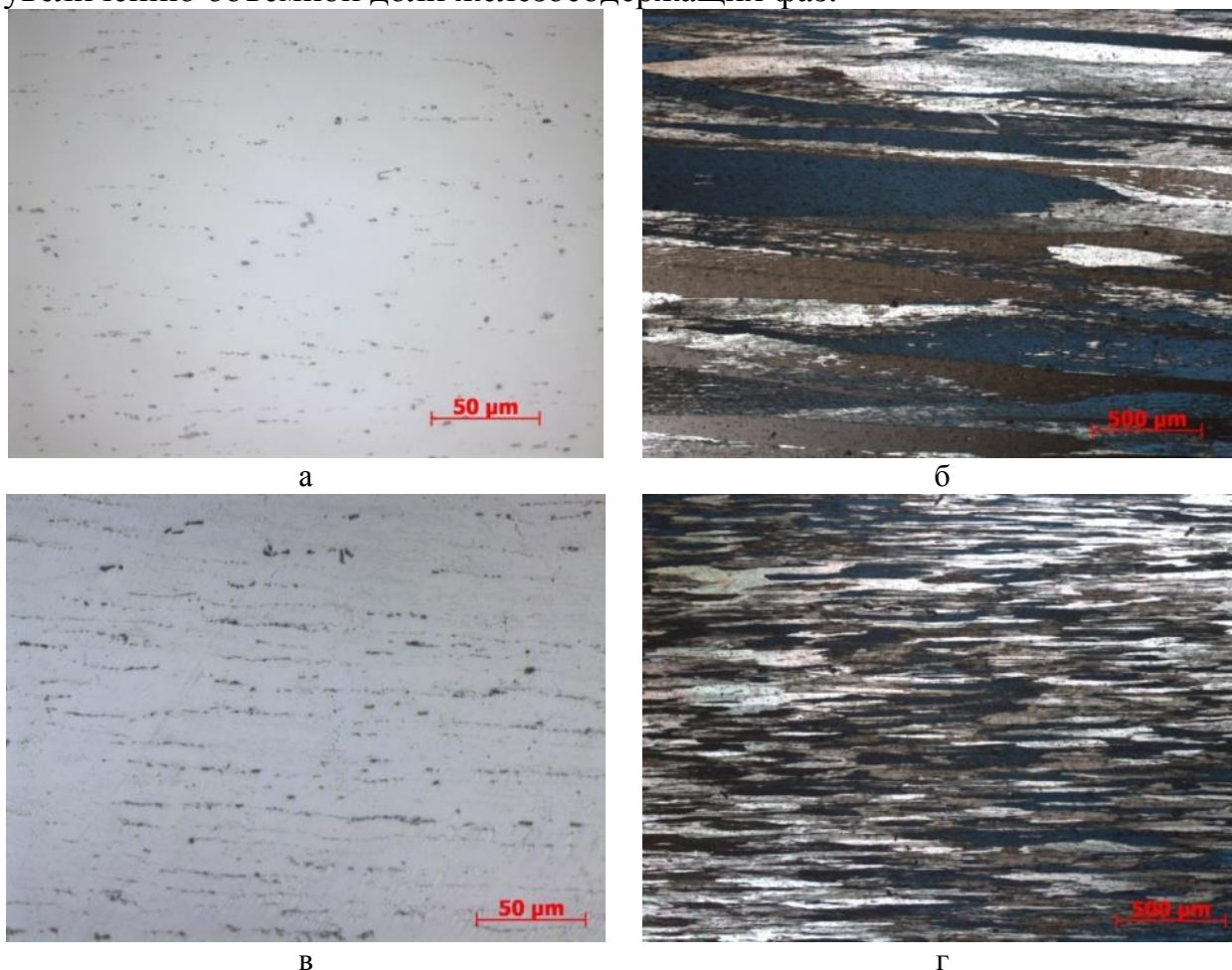


Рисунок 1 – Микроструктура катанки:

а,б –Al-0,27%Zr-0,20%Fe; в–Al-0,27%Zr-0,28%Fe,г – Al-0,33%Zr-0,20%Fe;
а, в – в светлом поле, $\times 500$; б, г – в поляризованном свете, $\times 50$

Было установлено, что исследуемая катанка, изготовленная из сплавов Al–(0,20–0,36)%Zr–(0,20–0,28)%Fe соответствует требованиям ASTM B941–05 по значениям удельного электрического сопротивления, табл. 1.

Таблица 1 – Свойства катанки из сплавов системы Al–Zr–Fe

Zr, масс.%,	Fe, масс.%,	σ_B , МПа	δ , %	ρ_{20} , Ом·мм ² /м
0,20	0,20	126	10	0,03147
0,20	0,28	144	12	0,03180
0,27	0,28	143	7	0,03296
0,29	0,20	140	8	0,03327
0,33	0,20	141	9	0,03349
0,36	0,20	140	9	0,03428
Требования ASTM B941–05		120	8	0,0285

С повышением концентрации циркония УЭС растет. Увеличение концентрации железа с 0,20 до 0,28 % в сплавах приводит к незначительному росту уровня УЭС (табл. 1). Значения временного сопротивления разрыву находятся примерно на одном уровне, за исключением сплава Al–0,20Zr–0,20Fe.

Достижение требований ASTM B941–05 по УЭС в катанке из малолегированных цирконием алюминиевых сплавов возможно после воздействия термической обработки. Известно положительное влияние на понижение удельного электрического сопротивления гетерогенизирующего отжига Al–Zr сплавов, основным процессом которого является снижение концентрации легирующих элементов в твердом растворе за счет его распада с выделением дисперсных частиц метастабильной фазы Al_3Zr [1–4].

Одинарный отжиг по исследуемым режимам в работах [1, 3, 4] не обеспечил необходимый уровень УЭС. Было показано, что для снижения УЭС катанки при одноступенчатом отжиге необходимо использовать длительные выдержки. В ранее проведенных работах [1, 3] для повышения производительности процесса термической обработки и более существенного снижения УЭС катанки из малолегированных сплавов системы Al–Zr рекомендовано использовать ступенчатый отжиг.

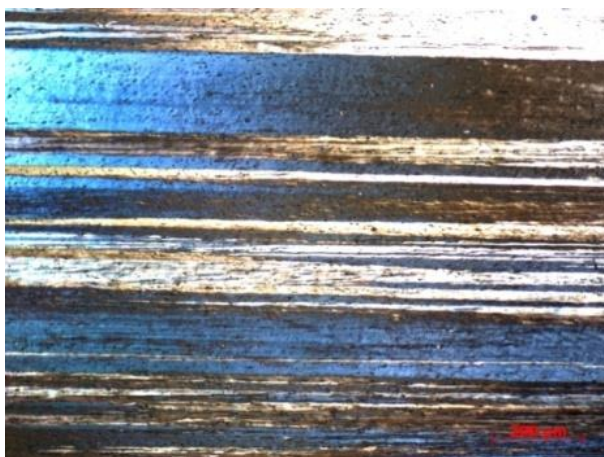
Исследуемые режимы ступенчатого отжига, а также значения временного сопротивления разрыву и УЭС катанки из сплава Al–0,27%Zr–0,28%Fe, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Режимы отжига и свойства катанки сплава Al–0,27Zr–0,28Fe

Отжиг	Режим отжига	ρ_{20} , Ом·мм ² /м	σ_b , МПа	δ , %
Одинарный	350 °С, 48 ч	0,03024	135	19
Ступенчатый	350 °С, 48 ч + вторая ступень	0,02803	134	23
Одинарный	400 °С, 12 ч	0,02959	127	23
Ступенчатый	400 °С, 12 ч + вторая ступень	0,02790	127	25

Исследования микроструктуры показали, что в сплаве Al–0,27%Zr–0,28%Fe после одинарного отжига по выбранным режимам остается волокнистая структура, характерная деформированному состоянию катанки, рис. 2, а. Выдержка на второй ступени отжига приводит к частично рекристаллизованной структуре, обеспечивающей сохранение прочностных свойств катанки на требуемом уровне, рис. 2, б.

Измеренные значения временного сопротивления разрыву и удельного электрического сопротивления катанки, отожженной по режимам двухступенчатого отжига, удовлетворяют требованиям международного стандарта ASTM B 941–05, табл. 2.



а



б

Рисунок 2 – Микроструктура катанки сплава Al–0,27%Zr–0,28%Fe после отжига в поляризованном свете, $\times 50$: а – первая ступень 350 °C, 48 ч; б – 350 °C, 48 ч + вторая ступень

Для определения термостойкости проводили высокотемпературные испытания на растяжение, свойства катанки приведены в табл. 3. После испытания катанки на растяжение при температуре 230 °C предел прочности сохранился на 90 %.

Таблица 3 – Свойства катанки при комнатной и повышенной температурах испытания

Сплав	После отжига (испытания при $t_{\text{ком}}$)			Испытания при $t = 230$ °C	
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	УЭС, Ом·мм ² /м	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$K_{\text{н}}$, %
Al-0,27%Zr-0,27%Fe	136	26	0,0284	124	91

$K_{\text{н}}$, % – остаточный коэффициент напряжения при нагреве

На втором этапе работы проводили исследования структуры и свойств прутков из сплавов системы Al–(0,5–3,5)%РЗМ, полученных СЛИПП, где РЗМ – Ce+La.

Микроструктура исследуемых прутков, изготовленных СЛИПП, представлена α -твердым растворами макронеоднородностью в виде строчечного расположения эвтектических колоний ($\alpha + \text{Al}_4\text{Me}$), имеющих пластинчатое строение (рис.3). Увеличение концентрации легирующих элементов усиливает неоднородность в структуре прутков, увеличивается объемная доля эвтектики. Значительное легирование сплавов, до 3,5 %РЗМ, приводит к грубой строчечной структуре по всему объему прутка (рис. 3,б).

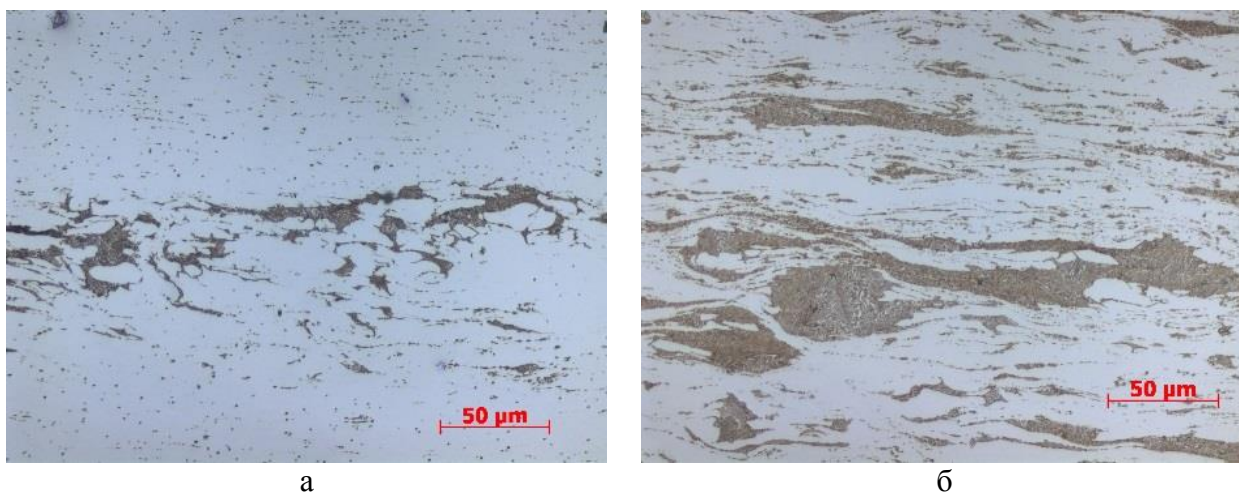


Рисунок 3– Микроструктура прутков, полученных СЛИПП, из сплавов Al-PЗМ, $\times 500$:
а – Al-0,5% PЗМ; б – Al-3,5% PЗМ

Анализ механических свойств показали, что для прутков исследуемых составов прочностные свойства находятся в пределах 119-172 МПа, пластичность – 20-27 %, табл.4. Минимальные прочностные свойства, чуть ниже требуемого предела, имеют прутки из сплава Al-0,5%PЗМ. Повышение концентрации PЗМ до 3,5 % приводит к росту прочностных характеристик на 50 %. Пропорционально повышению предела прочности в сплавах снижаются пластические характеристики.

Таблица 4 – Механические и электрофизические свойства катанки из сплавов на основе алюминия.

Сплав	Испытания при $t_{\text{ком}}$			Испытания при $t = 150^{\circ}\text{C}$	
	σ_B , МПа	δ , %	УЭС, Ом·мм ² /м	σ_B , МПа	K_n , %
Al-0,5%PЗМ	119	27	0,02614	119	100
Al-1,0%PЗМ	129	24	0,02643	118	92
Al-2,5%PЗМ	147	22	0,02807	119	81
Al-3,5%PЗМ	172	20	0,02902	139	81

Удельное электрическое сопротивление прутков составляет: 0,02614-0,02902 Ом·мм²/м.С ростом концентрации PЗМ удельное электрическое сопротивление прутков возрастает.

Исследование прутков из сплавов Al–(0,5-3,5)%PЗМ при повышенной температуре испытания 150 °С приведены в табл. 4. Снижение предела прочности прутков составляет не более 20% от первоначально измеренных значений.

Сравнительный анализ деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения позволил установить, что введение 0,5–2,5 % дорогостоящих PЗМ в алюминиевые сплавы незначительно увеличивает УЭС, которое соответствует требованиям ASTM B941–05. Легирование алюминиевых сплавов цирконием в количестве (0,20–0,36%Zr),

что на порядок ниже, чем РЗМ, резко повышает УЭС, которое существенно превышает требуемый предел. Для достижения заданных свойств в катанке, легированной цирконием, необходимо проводить гетерогенизирующий отжиг. При этом прочностные свойства катанки находятся на одном уровне, а относительное удлинение в 2 раза выше у прутков, легированных РЗМ.

Проведенные высокотемпературные испытания показали, что сплав Al-0,27Zr-0,28Fe сохраняет предел прочности на 90 % при температуре 230 °С, а сплавы, легированные РЗМ в количестве 1-3,5%, сохраняют свойства на 80-90 % только при температуре 150 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Бернгардт В.А., Дроздова Т.Н., Орелкина Т.А., Сидельников С.Б., Трифоненков Л.П., Фролов В.Ф., Сальников А.В., Федорова О.В./Разработка режимов отжига катанки из сплавов системы Al-Zr для достижения заданного комплекса свойств // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 5 (2014 7) 587-595.
2. Белов Н.А. Влияние циркония на структуру и механические свойства малолегированных сплавов системы Al-Fe-Si / Н. А. Белов, В. В. Истомин – Кастровский, А.Н. Алабин // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. - 2003. - № 4. - с. 54-59.
3. Бернгардт В.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства катанки из сплавов системы Al-Zr [электронный ресурс] Федорова О.В. // Молодежь и наука: IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 385-летию со дня основания г.Красноярска. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-006.pdf>
4. Белов, Н. А. Влияние отжига на электросопротивление и механические свойства холоднодеформированного сплава Al-0,6% (мас.) Zr / Н. А. Белов, А. Н. Алабин, А.Ю. Прохоров // Цветные металлы. – 2009. – № 10. – С. 65–68.